

S 波段相对论速调管振荡器研究

黄 华 甘延青 雷禄容 金 晓 鞠炳权 向 飞 冯弟超 刘 忠

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2007 年 4 月 29 日收到, 2007 年 7 月 6 日收到修改稿)

介绍利用 20 GW 加速器二极管产生的电子束源, 开展 S 波段相对论速调管振荡器(RKO)的理论设计、粒子模拟和实验研究的情况. 该 RKO 采用 3 个紧密耦合的圆柱腔作为振荡腔, 束流经过一段漂移管的群聚后采用三轴输出腔提取微波. 该振荡器具有起振时间快、结构紧凑、束波转换效率较高等优点. 采用无箔空心阴极和 0.9 T 的恒流源磁场引出的电压 1 MV、束流 13 kA、脉宽 40 ns 的环形电子束驱动 RKO, 单次运行输出了 3.5 GW 的辐射微波功率, 效率 27%, 频率 2.86 GHz, 瞬时带宽 2%, 脉冲重复频率 20 Hz. 运行时, 输出微波功率 3.4 GW. 实验结果与粒子模拟结果符合得较好.

关键词: 相对论速调管, 振荡器, 三轴提取腔, 高功率微波

PACC: 5240M

1. 引 言

在高功率微波振荡器研究中, 已有多种器件产生了大于 1 GW 的输出微波^[1]. 其中, 美国海军实验室研究的速调管振荡器(RKO)是通过电子束穿过多个不相互耦合的重入腔时产生的电子反射激励振荡^[2]. 该 RKO 长度较长, 结构比较复杂. 美国空军实验室研究的注入锁定 RKO^[3]采用两个相隔一定距离、具有一定耦合的重入圆柱腔产生振荡, 它需要一个较弱的注入信号, 结构比较复杂, 起振时间较长(大于 100 ns). 我们进行了多年的相对论速调管放大器(RKA)研究^[4-6], S 波段 RKA 分别输出了功率 1 GW、重频 100 Hz 和功率 3 GW、重频 10 Hz 辐射微波. 但开展强流 RKA 实验研究对加速器输出的电子束脉冲抖动性要求很严格, 这是因为 RKA 稳定工作要求电子束脉冲与微波种子源脉冲同步输出. 对于工作于强流高压的加速器来说近于苛刻, 这往往成为 RKA 稳定工作的决定因素. 本文提出了一种基于渡越时间效应、不需要微波种子源激励的 RKO, 自然不存在电子束与微波种子源同步工作的限制因素.

RKO 系统结构如图 1 所示, 其束波相互作用原理是二极管产生的强流相对论电子束在外加磁场引导下经过 3 个紧密耦合的圆柱谐振腔间隙时, 由于渡越时间效应, 在谐振腔内将激励多个模式的振荡, 发

生电子束能量与高频电磁场的能量交换. 由于谐振腔的选择作用, 电子束与 3 个耦合腔的 $2\pi/3$ 模式能量交换最大, 最后在谐振腔内形成强而稳定的 $2\pi/3$ 模式高频振荡电磁场, 对经过的电子束进行速度调制和密度群聚. 随后电子束在漂移管中继续发生群聚. 高度群聚的电子束经过三轴提取腔间隙时, 将在腔内激励更强的高频电场, 腔内的高频电场经过传输结构到圆锥喇叭, 把高频微波辐射到空间. 由于该 RKO 采用了强耦合的圆柱腔, 因而起振时间很快, 小于 10 ns. 同时, 系统长度较小, S 波段 RKO 高频系统(包括振荡腔、漂移管和提取腔)总长小于 30 cm. 因而需要的引导磁场长度也较短. 另外, 由于采用了三轴的微波提取腔, 与同轴腔相比, 它具有以下优点: 较高的提取效率, 而且需要的引导磁场强度也较小, 有利于系统的小型化.

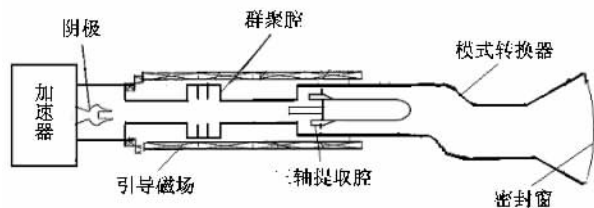


图 1 RKO 实验系统框图

下面, 先介绍 RKO 的理论设计和粒子模拟结果, 随后描述束流调制和微波提取实验情况.

2. 理论设计

2.1. 振荡腔的设计

根据渡越时间效应线性理论^[7]选择圆柱振荡腔的长度,再根据频率要求选择圆柱腔的外径.圆柱腔的个数选择需要折中考虑:一方面,圆柱腔个数越多,电子束与圆柱腔高频场的能量交换越大,束流的基波调制将越强,起振时间也越短;另一方面,圆柱腔个数越多,振荡器可能激励的模式也越多,输出微波的频谱也越杂乱,同时增加了器件的长度.另外粒子模拟发现,双间隙振荡器的基波调制深度只有30%,3间隙振荡器的调制深度为70%,4腔振荡器的调制深度为80%.可以看出,3间隙振荡器的调制深度可以达到微波提取的要求.因此,本文选择了3个圆柱腔作为RKO的振荡腔.

采用Mafia程序可以算出3间隙振荡腔多种模式的谐振频率、场强分布、能量交换系数和特性阻抗等参数.根据渡越时间效应,可以算出3间隙振荡腔的 $2\pi/3$ 模式束波转换效率为

$$\eta = -\frac{1}{4} \left(\frac{V_m}{V_0} \right)^2 F_3(\theta_0), \quad (1)$$

式中, V_m 为每个间隙的高频电压幅值, V_0 为电压, θ_0 为每个腔的电子直流渡越角,3间隙振荡腔的能量交换系数 $F_3(\theta_0)$ 表达式^[7]为

$$F_3(\theta_0) = [10 - 16\cos\theta_0 + 8\cos(2\theta_0) - 2\cos(3\theta_0) - 8\theta_0\sin\theta_0 + 8\theta_0\sin(2\theta_0) - 3\theta_0\sin(3\theta_0)]\theta_0^2. \quad (2)$$

计算的一组3间隙振荡腔最低三种模式的高频参数如表1所示.其中,漂移管半径2.8 cm,腔体半径5.2 cm,间隙3 cm,间隙与谐振腔高度相等,谐振腔间的模片厚度为0.5 cm,腔间通过电场耦合.由计算结果可以判定,该振荡腔存在的最低三种对称模式分别为0模、 $\pi/3$ 和 $2\pi/3$, $2\pi/3$ 模的纵向电场分布如图2所示.根据能量交换系数和特性阻抗的物理意义可以大致判定:0模的能量交换是电子束从电磁场中获得能量, $\pi/3$ 模只有少部分的电子束能量转换为电磁场能量, $2\pi/3$ 模是电子束把能量交换给电磁场,能量交换系数最大,为3间隙振荡腔的主要工作模式.在粒子模拟中将得到进一步的证实.

表1 3间隙振荡腔高频参数数值计算结果

模式	谐振频率/MHz	能量交换系数	特性阻抗/ Ω
0	2540	0.2	42
$\pi/3$	2690	-0.17	126
$2\pi/3$	2848	-2.7	34

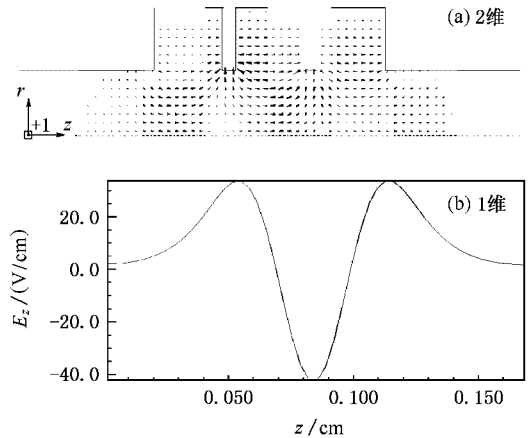


图2 振荡腔的 $2\pi/3$ 模轴向电场分布

2.2. 提取腔的设计

在HPM器件研究中,有多种微波提取腔结构,比如,同轴腔^[4],扩展相互作用腔^[8]等.同轴腔的提取效率较低,扩展相互作用腔的提取效率较高,而且这两种腔需要的引导磁场比较高,特别是对于1 MV/15 kA的电子束,需要的3倍布里渊引导磁场大于1 T.在该RKO中,作者采用了在S波段RKA研究中成功运用的三轴(内导体、重入圆柱鼻锥和圆柱腔等三轴)微波提取腔^[9],降低电子束的空间电荷效应及势能,抑制电子的反射,从而使RKA的效率得到了提高,而且需要的引导磁场较低.三轴提取腔的理论分析与设计详见文献[9]和[10].

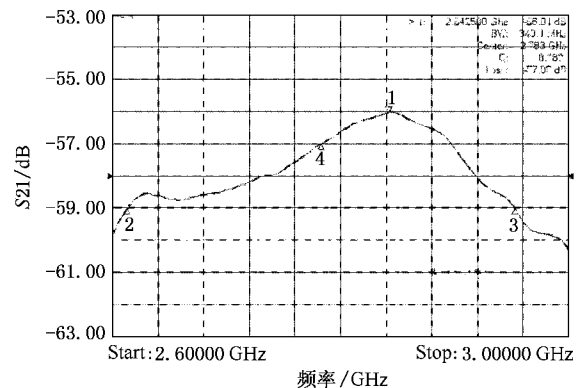


图3 三轴输出腔的谐振曲线

根据理论分析,设计和调试了三轴提取腔,三轴提取腔为腔长 $3\lambda/4$ 、特性阻抗 $42\ \Omega$ 的同轴腔,腔内微波通过腔端壁上的 4 个耦合孔输出,调节耦合孔的大小调节三轴腔的有载 Q 值,通过大量实验,调试出了有载 Q 值为 8 的输出腔,谐振曲线如图 3 所示^[10].

3. 粒子模拟

采用 KARAT 粒子模拟程序,对上述大致确定的电子束经过高频系统的束流调制及微波提取情况进行了初步的粒子模拟.采用的电子束参数为束压 $V_0 = 1\ \text{MV}$ 、束流 $I_0 = 15\ \text{kA}$ 、电子束半径 $r_b = 2.0\ \text{cm}$ 、厚度 $3\ \text{mm}$ 、引导磁场强度 $1.2\ \text{T}$ 、束流电压前沿都设为 $1\ \text{ns}$.对强流相对论电子束经过 3 间隙振荡腔的束流调制与群聚情况进行了模拟,模拟结果如图 4 所示.由图 4 可以看出,3 间隙振荡腔使强流相对论电子束 (IREBs) 产生了很强的电流调制和群聚,在距间隙出口 $25\ \text{cm}$ 处最大基波调制电流达到 $8\ \text{kA}$.由图 4 (d) 可以看出,IREBs 在谐振腔间隙出口已产生了较强电流调制和群聚,同时由电子相位图可知 IREBs 经过振荡腔产生了电子反射,反射电子比例为

4.6%.显然,从粒子模拟可以判定,该腔体的束波相互作用机理与 RKA 不一样 (IREBs 经过 RKA 的谐振腔间隙主要产生电子束的调制,基本上不产生电子束的群聚),同时让我们想到,在这种结构的束流调制中,除了存在电子渡越时间不稳定性的束波相互作用机理之外,可能还存在虚阴极、电子反射等电子自反馈的束波相互作用机理,加快和增强了振荡腔的起振.

在调制电流最大的位置放置三轴提取腔,输出微波模拟结果如图 5 所示.最大输出微波功率为 $3.98\ \text{GW}$,束波转换效率为 31%.同时,模拟了输出微波功率随引导磁场强度的变化,模拟结果发现,在一定范围内,输出微波随引导磁场强度的增加而增加,当引导磁场达到 $1.3\ \text{T}$ 时,输出微波功率达到最大.这是因为增大引导磁场,可以有效约束电子的群聚状态,抑制群聚团的散开.引导磁场增大到一定数值后再增大,进一步的约束效果就不明显了.

4. 实验结果及分析

4.1. 实验系统

S 波段 RKO 实验系统如图 1 所示.电子束由 $20\ \text{GW}$ 加速器的二极管产生,电子束功率从 $10\ \text{GW}$ — 20

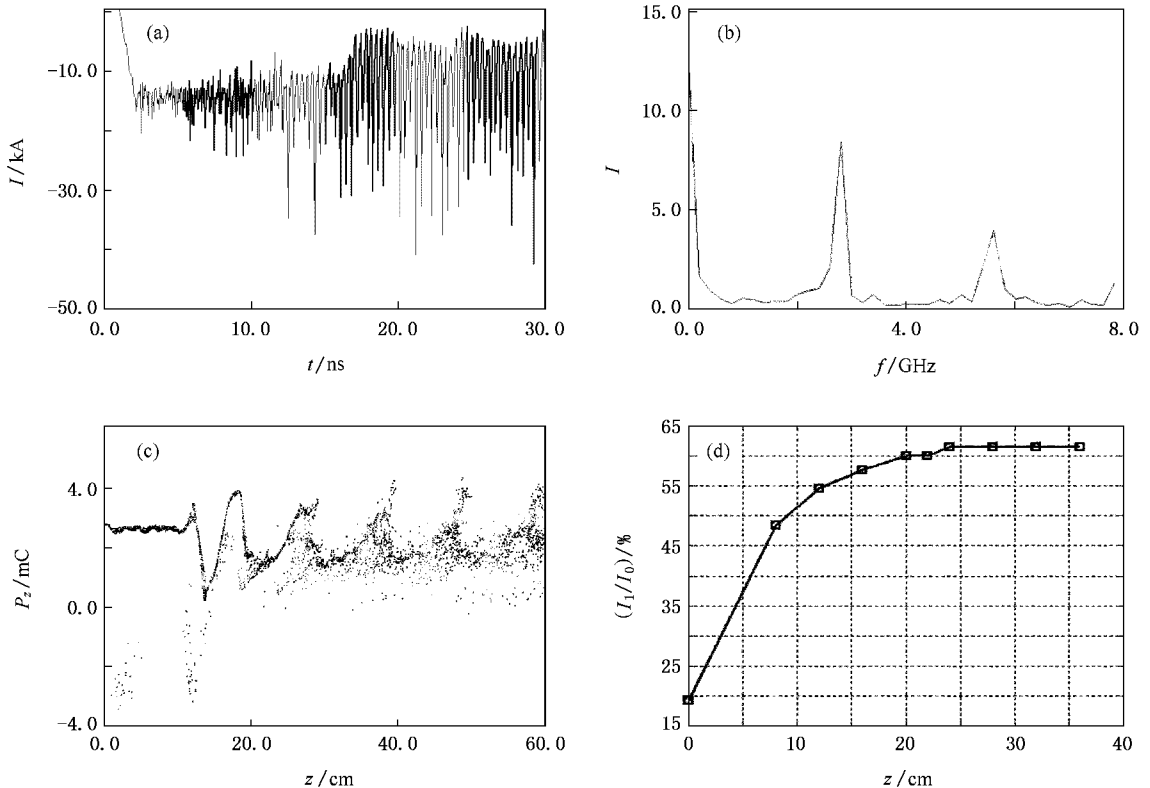


图 4 3 间隙振荡腔的束流调制相关参数的波形 (a) 电流波形 (b) 电流频谱 (c) 电子动量分布图 (d) 调制电流随纵向距的变化

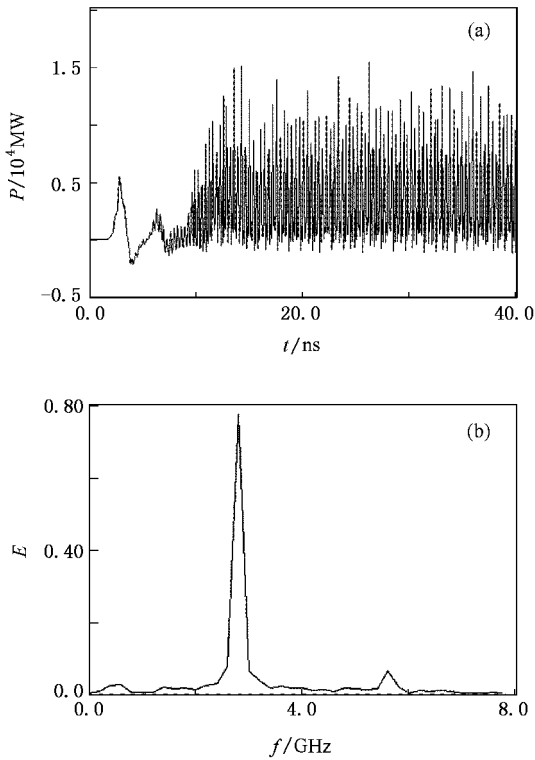


图5 RKO 输出微波的粒子模拟结果 (a) 微波功率波形 (b) 微波电场频谱

GW 可调,最高重复频率为 100 Hz,束流脉宽 45 ns,引导磁场由恒流源产生,最大磁场强度为 9.5 kGs.为了达到 RKO 的导流系数及效率要求,二极管进行了非匹配的设计,因此加速器输出电压和功率不是最佳输出,输出线路具有较大的反射.为了达到较强的阴极发射能力,阴极头采用了半径 2 cm、厚度 3 mm 的空心石墨.经测试,采用 0.9 T 的恒流源引导磁场,从二极管引出了 ~ 1 MV/18 kA 的总电子束,进入漂移管的束流采用法拉第筒测量,束流约为 13 kA.强烈群聚的电子束经过三轴提取腔间隙时,将在腔内激励非常强的高频电场,腔内的高频电场经过同轴输出线和 TEM-TM₀₁-TE₁₁ 模式转换器后传输到圆锥喇叭(增益 20.5 dB),把高频微波辐射到空间.辐射微波功率采用位于球面半径 5.86 m 的 BJ-32 开口波导天线阵列接收后进行功率密度积分所得,或者是根据辐射天线的增益进行计算.

4.2. 束流调制

利用位于漂移管壁中的 4 个磁探针阵列(B_θ 环)监测束流经过 3 间隙振荡腔间隙后基波调制电流沿纵向的变化,实验结果如图 6 所示.在距振荡腔间隙后 11 cm 处,得到了 7.5 kA 的最大基波调制电

流,调制电流频率 2.84 GHz,调制深度约 60%,束流调制脉宽 ~ 20 ns,在此位置可以插入输出腔间隙.另外,实验中还经常发现,3 间隙振荡腔还产生 1 个频率 2.64 GHz 的调制电流,如图 6 中频谱所示,该调制电流幅度最大为 5.1 kA.由粒子模拟结果可以知道,该振荡腔激励了 $\pi/3$ 模.由于两种模式的竞争工作,造成了调制电流波形比较杂乱.在粒子模拟中发现了同样的问题.因此,3 间隙振荡腔结构,特别是腔长的选择有待进一步的优化.采用该 $2\pi/3$ 模的基波调制电流,如果输出腔与调制电流谐振并与输出负载匹配,那么可以转换为微波的电子束最大功率约 3.8 GW ($P_{\text{out-max}} = V_0 I_1 / 2$).

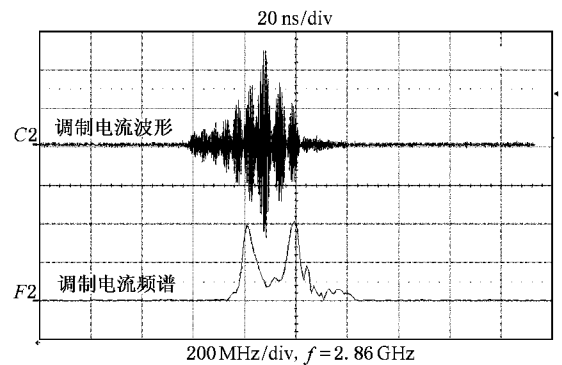


图6 电子束经过 3 间隙振荡腔后的调制电流

4.3. 微波提取

在 3 间隙振荡腔后电流群聚的最大位置放置新研制的低 Q 值 3 轴输出腔,进行了微波提取及重复频率运行的实验研究,并获得了初步的成功.单次运行时的输出微波波形及频谱如图 7 所示,经过标定测试,采用接收喇叭阵列的功率密度积分(积分角度为 $\pm 30^\circ$)辐射功率为 3.5 GW,根据喇叭增益计算辐射微波功率为 3.8 GW,两者结果比较一致.微波脉宽 $t_{\text{half}} = 20$ ns,频率 $f_0 = 2.86$ GHz,3 dB 带宽 $\Delta f = 55$ MHz,相对带宽 $\Delta f/f = 2\%$,束波转换效率 29%.从输出微波频谱以及空间不同位置的微波波形可以看出,输出微波模式比较纯,频率为 2.64 GHz 的 $\pi/3$ 模没有输出,这主要是因为该模式与 3 轴输出腔不谐振,而且模式转换器对该频率还有一定的滤波作用.另外还有一个特别发现,该 RKO 输出微波的瞬时带宽比较宽,达到 2%,远大于 RKA 的相对瞬时带宽 (0.8%),也大于 MILO 的瞬时带宽 (1%).初步分析,这可能是这是因为强流相对论电子束对振荡腔造成的很强束流负载效应和低的有载 Q 值 ($Q_{\text{cl}} = 8$) 造

成的.

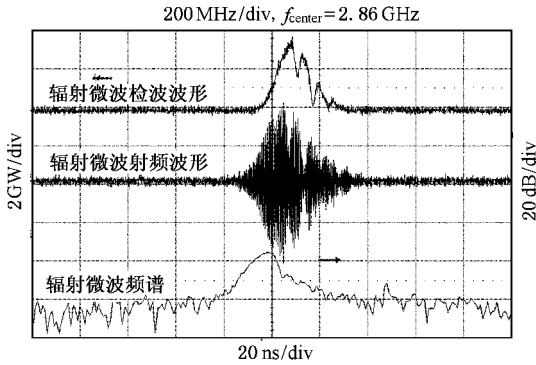


图 7 RKO 单次运行输出微波波形

随后开展了重复脉冲电子束驱动 RKO 的实验研究,在低重频获得了较好的实验结果.重频 10 Hz, 20 Hz 运行时的输出微波波形如图 8 所示.输出微波

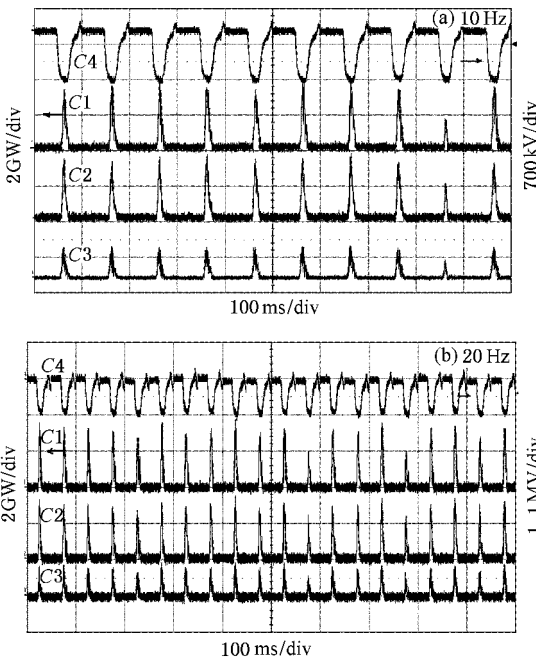


图 8 RKO 不同重复脉冲频率运行时的输出微波(C1—C3—空间不同角度的辐射微波波形,C4—电压)

功率和单次运行相比,重频运行时功率没有明显的降低,脉宽一样,每个脉冲的幅度基本一致,此时每个脉冲的微波功率为 3.4 GW.重频 30 Hz 的电子束驱动 RKO 时,输出微波脉冲幅度变得不稳定,有 16 个输出微波脉冲幅度比较大,另外 14 个微波脉冲幅度非常小.实验后拆开 3 轴输出腔发现,在腔间隙两端有明显的射频击穿痕迹,腔体金属已经变成蓝黑色,另外还有少量电子回流轰击的痕迹.初步计算分析发现,输出功率为 3.5 GW 时,腔间隙电场达到 650 kV/cm,电压达到 1.1 MV,系统的真空度为 3×10^{-3} Pa.这样高的间隙电场,射频击穿和电子反射是很容易发生的,所以输出微波的脉宽也比较窄.另外,收集极为不带水冷却的石墨,它紧靠近作用间隙放置,高重频运行时石墨产生的杂质和等离子体会造成高频间隙短路.因此,为了提高 RKO 高重频的稳定工作,需要进一步改进提取腔和收集极的设计,比如采用双间隙或多间隙提取腔,可以降低提取间隙的电场.

5. 结 论

本文详细介绍了一种强流强相对论速调管振荡器的理论设计、粒子模拟和实验研究结果.该速调管振荡器采用 3 个紧密耦合的圆柱腔作为振荡器的振荡腔(工作模式为 $2\pi/3$ 模),束流经过一段漂移管的群聚后采用三轴输出腔提取微波.该振荡器具有起振时间短、结构紧凑、束波转换效率比较高和瞬时带宽比较宽等优点.采用无箔空心阴极和 0.9 T 的恒流源磁场引出的电压 1 MV、束流 13 kA 的环形电子束驱动 RKO,单次运行输出了 3.5 GW 的辐射微波功率,效率 27%,频率 2.86 GHz,瞬时带宽 2%,脉冲重复频率 20 Hz 运行时,输出微波功率 3.4 GW.实验结果与粒子模拟结果符合得较好.实验证实该 RKO 重复频率高于 30 Hz 运行时还存在输出微波幅度不稳定问题,还需要开展进一步的研究.

[1] Barker R J , Schamiloglu E 2001 *High-Power Microwave Sources and Technologies* (New York : IEEE) 77

[2] Friedman M , Serlin V , Drobot A , Sefor L 1984 *J. Appl. Phys.* **56** 2459

[3] Hendricks K J , Haworth M D *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26**

320

[4] Huang H , Fan Z K , Tan J , Ma Q S , Gan Y Q , Chang A B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1129 (in Chinese) [黄 华、范植开、谭杰、马乔生、甘延青、常安碧 2004 物理学报 **52** 1129]

[5] Huang H , Feng D C , Lei L R , Luo G Y , Tan J , Chen Z G , Liao

- Y, Yu A M, Jin X, Meng F B 2007 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **31** 288 (in Chinese)[黄 华、冯弟超、雷禄容、罗光耀、谭 杰、陈志刚、廖 勇、于爱民、金 晓、孟凡宝 2007 高能物理与核物理 **31** 288]
- [6] Huang H, Feng D C, Luo G Y, Chen Z G, Lei L Y, Liao Y, Tan J, Jin X, Meng F B 2007 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35** 384
- [7] Fan Z K 1999 *Ph. D. Thesis*(Beijing Graduate school, CAEP (Beijing)) p26 (in Chinese)[范植开 1999 博士学位论文(北京 : 中国工程物理研究院研究生部)第 26 页]
- [8] Li Z H, Meng F B, Chang A B, Huang H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3578 (in Chinese)[李正红、孟凡宝、常安碧、黄 华 2005 物理学报 **54** 3578]
- [9] Huang H, Meng F B, Fan Z K, Li Z H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5344 (in Chinese)[黄 华、孟凡宝、范植开、李正红 2006 物理学报 **55** 5344]
- [10] Huang H 2006(Beijing Graduate school, CAEP(Beijing)) p43 (in Chinese)[黄 华 2006 中国工程物理研究院研究生部(北京) 第 43 页]

Investigation on an S-band relativistic klystron oscillator

Huang Hua Gan Yan-Qing Lei Lu-Rong Jin Xiao
 Ju Bing-Quan Xiang Fei Feng Di-Chao Liu Zhong
 (Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)
 (Received 29 April 2007 ; revised manuscript received 6 July 2007)

Abstract

The physics of modulation and rf extraction of an S-band relativistic klystron oscillator is studied in this paper via experiment, theory, and simulation. It is found that the intense relativistic electron beams (IREBs) can be intensely current-modulated when the IREBs drift through three pillboxes with high coupling. After bunching in the downstream the modulated IREBs can excite high-power microwave in the triaxial cavity. These properties, which have short oscillating time, compact geometry and high beam-wave conversion efficiency, were encouraging. Using a 1 MV, 13 kA, 40 ns electron beam and a 0.9 kGs leading magnetic field, 3.5 GW radiated power was extracted in 20 ns FWHM pulses at 2.86 GHz. The efficiency was 27%, and the instantaneous bandwidth was 2%. The radiated power was 3.4 GW when the repetition rate IREBs was 20 Hz. The experimental results agree well with the simulations.

Keywords : relativistic klystron, oscillator, triaxial output cavity, high power microwave

PACC : 5240M